

数字文旅专业系列教材 · 教学课件

智慧旅游系统架构设计与实践

第4章 感知基础设施层（S）——物联网与传感器网络

授课对象：安顺学院旅游管理学院 · 旅游管理专业本科生

主讲：祝刚

本章导览

- 4.1 感知层的定位与组成
- 4.2 物联网关键技术
- 4.3 多源异构数据采集与融合
- 4.4 感知层的工程实践
- 国际比较与经验借鉴
- 技术经济学分析
- 社会文化影响
- 监管框架与政策环境
- 产业化路径与商业模式创新
- 前沿研究方向
- 实践案例深度分析
- 理论深化与前沿探讨
- 产业化路径补充

- 识记：感知层的三大要素与主要传感器类型
- 理解：多源异构数据采集协议与融合算法原理
- 应用：设计智慧景区感知设备部署方案
- 分析：分析不同传感器在旅游场景中的适用性与局限性
- 评价：评估感知层架构的覆盖度与数据质量
- 创造：设计面向山地型景区的多层次感知网络方案

- 黄山风景区部署了覆盖全山的物联网感知系统，包括温湿度传感器、PM2.5 监测仪、客流计数器、地质位移监测仪等上万个传感器节点。
- 系统通过 LoRa 低功耗广域网将数据汇聚到边缘网关，再经 5G 网络传输至云端平台。
- 管理人员可以实时查看各景点的环境参数、客流密度和设施状态，实现了 " 看得见、管得住、防得好 " 的智慧管理目标。
- Guo 等（2014）在分析中国智慧城市与旅游物联网融合时描绘了类似的智慧景区智能架构体系 [1]——采用同心圆结构从底层物联网设备层到应用层逐层展开。

01

4.1 感知层的定位与组成

4.1.1 感知层在 S.M.A.R.T. 框架中的定位

- 感知基础设施层（S）是 S.M.A.R.T. 框架的最底层，是整个智慧旅游系统的 " 感官系统 "。
- 没有感知层的数据采集，数据平台层（M）就没有数据可处理，应用层（A）就没有数据可分析，安全治理层（R）就没有数据可保护，旅游生态层（T）就没有数据可共享。
- 感知层的重要性可以用一句话概括：数据是智慧旅游的血液，而感知层是造血器官。
- Gretzel 等（2015）在智慧旅游奠基性文献中强调，" 智慧旅游明确依赖于不仅收集海量数据，而且智能地存储、处理、组合、分析和使用大数据以指导商业创新、运营效率和体验创造的能力 "[2]。
- 这里 " 收集海量数据 " 正是感知层的核心职责。

4.1.2 感知层的三要素

- 感知层由三大要素构成：
- 传感器节点。负责感知物理世界并转换为数字信号。
- Rosário 和 Dias （2024）的系统性文献计量综述显示 [3]，IoT 传感器在智慧旅游中的研究覆盖了环境监测、客流计数、位置追踪、设施状态监测等多个维度。
- 终端设备。包括智能手机、平板电脑、智能穿戴设备、自助服务终端等用户交互设备。终端设备既是数据的生产者（如手机 GPS 产生的位置数据），也是数据的消费者（如接收推荐信息）。
- 通信模块。负责将传感器和终端设备产生的数据传输到上层平台。通信技术的选择直接影响感知层的覆盖范围、数据传输速率和功耗特性。

4.1.3 感知层与网络层的接口设计

- 感知层与网络层（数据平台层 M 的前端）的接口设计是架构的关键 " 接缝 "。
- Tang 等（2022）在研究智慧旅游导向的传感器网络时指出 [4]，感知层与网络层的接口需要解决三个核心问题：协议适配（不同传感器使用不同通信协议）、
- 数据格式标准化（统一数据格式以便后端处理）和流量控制（防止大量传感器同时发送数据导致网络拥塞）。

02

4.2 物联网关键技术

4.2.1 RFID 技术与电子门票系统

- RFID（射频识别）技术是智慧旅游感知层最早大规模应用的技术之一。
- 电子门票系统是 RFID 在旅游领域的典型应用——游客购买电子票后获得一个唯一 RFID 标签，入园时通过 RFID 读卡器自动核验，实现无接触快速通行。
- Tripathy 等（2018）在 iTour 框架中集成了 RFID 作为核心感知技术之一 [5]，与蓝牙、GPS、Wi-Fi 和传感器共同构成多模态感知体系。
- 该框架展示了 RFID 在票务、租车、餐厅预订等多个旅游服务场景中的应用。

4.2.2 传感器网络与环境监测

- 环境监测传感器网络是智慧景区感知层的重要组成部分。典型的环境传感器包括：
- Almobaideen 等（2016）在研究云中心 IoT 的智慧考古旅游时 [6]，提出了感知层的一般架构，明确了各种组件在智慧旅游感知中的角色分工。
- 该架构为不同类型传感器的集成部署提供了参考框架。

4.2.3 GPS/ 北斗定位与 LBS 服务

- 卫星定位技术是智慧旅游位置服务（LBS）的基础。GPS 和北斗双模定位可以实现米级精度的室外定位，支持导航、轨迹记录、地理围栏等功能。
- Peng 等（2020）在 5G 智慧旅游 IoT 架构中将卫星遥感系统作为用户层的重要数据源 [7]，与无线传感系统和 RFID 系统并列。

4.2.4 蓝牙 Beacon 与室内定位

- 室内定位是智慧旅游感知层的难点——卫星信号在室内不可用。蓝牙 Beacon 技术通过部署低功耗蓝牙信标，实现亚米级室内定位，广泛应用于博物馆、展馆和室内景区的智慧导览。
- Cepeda-Pacheco 和 Domingo （2022）在智慧城市旅游推荐系统中将蓝牙设备列为重要的 IoT 终端 [8]。

03

4.3 多源异构数据采集与融合

4.3.1 数据采集协议

- 智慧旅游感知层涉及多种数据采集协议，每种协议有其适用场景：
- MQTT （ Message Queuing Telemetry Transport ）。轻量级发布 / 订阅消息协议，适用于低带宽、不稳定网络环境下的传感器数据传输。是智慧旅游 IoT 最常用的协议。
- CoAP （ Constrained Application Protocol ）。专为资源受限设备设计的 RESTful 协议，适合电池供电的低功耗传感器。
- HTTP/HTTPS 。标准 Web 协议，适用于带宽充足、计算能力较强的终端设备（如智能摄像头）。
- Bi 和 Liu （ 2022 ）在基于机器学习的云 IoT 平台中 [9] ，使用 MQTT 协议连接各类 IoT 终端设备（电脑、汽车、飞机、手机）到云平台，实现了旅游信息服务的智能化。

4.3.2 数据融合算法

- 多源异构数据融合是感知层的关键技术挑战。主要融合算法包括：
- 卡尔曼滤波。适用于线性高斯系统的状态估计，常用于定位数据的平滑处理。
- 贝叶斯估计。基于概率论的融合方法，适合处理不确定性较高的传感器数据。
- D-S 证据理论。适用于不完全信息下的决策融合，常用于多传感器目标识别。
- 深度学习融合。利用神经网络自动学习多源数据的融合特征，适用于复杂的非线性融合场景。

4.3.2 数据融合算法

- Cepeda-Pacheco 和 Domingo （2022）将深度学习与 IoT 结合 [8]，在设备层 - 雾层 - 云层架构中实现了智能学习算法驱动的个性化推荐。

4.3.3 边缘网关与数据预处理

- 边缘网关是感知层与网络层之间的 " 翻译器 " 和 " 过滤器 "。
- 边缘网关的核心功能包括：协议转换（将不同传感器协议统一为 MQTT 或 HTTP）、数据清洗（过滤异常值和重复数据）、数据压缩（减少网络传输量）和数据预处理（执行简单的聚合计算）。
- Chen （2022）在研究智能旅游 IoT 服务平台的旅游管理策略时 [10]，强调了边缘网关在降低后端处理压力方面的关键作用。

04

4.4 感知层的工程实践

4.4.1 智慧景区感知设备部署方案

- 智慧景区感知设备部署需要综合考虑地形、气候、供电、通信等约束条件。林勇军和程道雷（2022）在研究基于物联网和 5G 的智慧旅游云平台时 [11]，提出了覆盖景区全域的感知设备部署方案。
- 2025 年的研究进一步提出了基于广电异构组网的智慧景区管理平台 [12]，采用 " 双光纤环网 +700MHz 5G 广播补盲 " 的融合架构突破复杂地形限制。

4.4.2 传感器网络拓扑设计与优化

- 传感器网络拓扑设计直接影响覆盖率和可靠性。常见的拓扑结构包括星型（简单但单点故障风险高）、树型（分层管理但中间节点负载大）和网状（高可靠性但部署复杂）。
- Ma （2023）在开发基于 IoT 和机器学习的智慧旅游服务系统时 [13]，采用了混合拓扑——核心区域使用网状拓扑保障可靠性，外围区域使用星型拓扑降低成本。

4.4.3 感知设备运维与故障诊断

- 大规模传感器网络的运维是一个持续性挑战。户外环境中的传感器面临温度 extremes、湿度、雷击、动物破坏等多种风险。
- Novera 等（2022）在 IoT 智慧旅游文献综述中指出 [14]，传感器故障率是影响感知层数据质量的主要因素，年均故障率通常在 5-15% 之间。
- 有效的运维策略包括：自动健康检测（定期发送心跳包检测设备状态）、预测性维护（基于历史故障数据预测设备寿命）和远程固件升级（OTA 更新修复已知问题）。

05

国际比较与经验借鉴

感知层技术路线的全球比较

- 不同国家在智慧旅游感知层技术路线上存在显著差异。欧洲注重低功耗广域网（LPWAN）技术，如 LoRa 和 Sigfox，强调长期可持续运行。
- 美国偏向高性能传感器和 AI 驱动的智能感知，如 Google 的视觉识别技术。
- 中国则在 5G+IoT 融合方面走在前列，Peng 等（2020）的 5G 智慧旅游 IoT 三层架构 [7] 体现了中国技术路线的特色。

巴塞罗那 IoT 感知实践

- 巴塞罗那的智慧城市旅游 IoT 架构以游客为核心用户，通过 RFID 发射器和终端发射器（手机、平板、电脑）与互联网连接，实现数据采集与交互 [15]。
- 后端由 SOA 平台和云平台支撑，处理来自物联网设备的数据，并通过大型屏幕向游客提供可视化信息展示。这一实践展示了感知层与上层平台的紧密集成。

06

技术经济学分析

感知层投资优化

- 感知层通常是智慧旅游系统投资最大的部分，占总投资的 30-40%。
- 优化策略包括：分阶段部署（先核心景区后扩展区域）、多传感器融合（一个传感器节点集成多种感知功能，降低单位成本）和共享基础设施（多个景区共享边缘网关和通信网络）。

07

社会文化影响

感知数据与游客隐私

- 感知层大规模部署传感器不可避免地涉及游客隐私问题。
- 摄像头采集游客面部信息，Wi-Fi 探针采集手机 MAC 地址，GPS 采集游客轨迹——这些感知数据虽然对景区管理和个性化服务有巨大价值，但也可能侵犯游客隐私。
- Masseno 和 Santos （2018）警告，" 由游客产生并在智慧旅游环境中处理的数据大多涉及来自社交网络、智能应用、无处不在的传感器等多种来源的个人数据 "[16] 。
- 在 S.M.A.R.T. 框架中，感知层（S）的隐私保护需要与安全治理层（R）协同设计。
- 具体措施包括：数据最小化（只采集业务必需的数据，不采集与旅游服务无关的个人信息）、匿名化处理（在感知层就对数据进行脱敏，

- 如将面部图像转换为年龄性别标签而不存储原始图像）和知情同意（通过标识牌和 App 通知告知游客感知设备的部署位置和数据用途）。

感知技术与文化敏感性

- 不同文化背景下，游客对感知技术的接受度存在差异。在文化遗址和宗教场所，摄像头的部署可能引发文化敏感性问题。例如，某些少数民族地区对摄影有文化禁忌，感知设备的设计需要尊重当地文化传统。
- 这要求感知层架构设计不仅是技术决策，也是文化决策——架构师需要与当地社区协商，在技术可行性和文化可接受性之间找到平衡。

数字包容与感知可达性

- 感知层的设计应考虑不同群体的可达性需求。老年游客可能不使用智能手机，无法通过手机 GPS 被感知；视障游客可能无法使用视觉导览终端。
- 包容性感知设计要求系统不仅依赖游客自带的终端设备进行感知，还应部署环境传感器（如独立于游客设备的客流计数器和环境监测仪）确保对所有人公平的服务覆盖。

08

监管框架与政策环境

- 随着 IoT 设备的大规模部署，物联网安全已成为国家网络安全战略的重要组成部分。《网络安全法》要求网络运营者采取技术措施防范网络攻击和安全风险。
- 在智慧旅游感知层，这意味着所有 IoT 设备都需要满足基本的安全要求：设备认证（防止伪造设备接入）、数据加密（防止传输过程中被窃听）、
- 固件签名（防止恶意固件更新）和访问控制（限制设备的管理权限）。
- Hamid （2024）在研究 IoT 改善埃及旅游企业业务时指出 [17]，IoT 设备的安全性不仅关乎数据保护，更直接影响旅游企业的声誉和游客信任。
- 一次 IoT 设备被攻击的事件可能导致游客对整个景区智慧服务的信任崩塌。

- 《个人信息保护法》对个人信息采集设定了严格的法律框架。感知层的数据采集活动需要遵循以下合规原则：
- 合法性基础。采集游客个人信息需要取得游客的知情同意，或基于其他法定合法性基础（如履行合同所必需、为公共利益实施新闻报道等）。
- 最小必要原则。只采集提供旅游服务所必需的个人信息，不得过度采集。例如，客流计数器应使用不识别个人身份的红外计数技术，而非人脸识别。
- 目的限制。采集的数据只能用于告知游客的目的，不得挪作他用。例如，为安全监控采集的视频数据不得用于商业分析。

09

产业化路径与商业模式创新

感知设备即服务（DSaaS）

- 感知设备即服务（Device Sensing as a Service, DSaaS）是一种新兴的商业模式——供应商负责感知设备的采购、部署、运维和数据提供，景区按月或按数据量付费。
- 这种模式消除了景区的初始投资门槛，特别适合预算有限的中小型景区。
- DSaaS 模式的技术基础是感知层的标准化和云化。当感知设备、通信协议和数据格式实现标准化后，供应商可以在多个景区之间复用技术方案和运维团队，实现规模效应。
- Chen（2022）的智能旅游 IoT 服务平台研究 [10] 为 DSaaS 模式提供了技术参考。

感知数据货币化

- 感知层采集的数据本身具有商业价值。环境数据可以出售给气象服务公司，客流数据可以出售给商业地产投资者，行为数据（匿名化后）可以出售给市场研究机构。
- 然而，数据货币化涉及复杂的法律和伦理问题——特别是当数据涉及游客个人信息时，需要确保匿名化处理不可逆，且数据交易获得游客的授权。

10

前沿研究方向

自供能传感器

- 传统传感器依赖电池供电，电池寿命限制了感知网络的可持续运行。自供能传感器通过能量采集技术（太阳能、温差能、振动能）实现自供电，理论上可以永久运行。
- 在智慧旅游场景中，太阳能供电的传感器已在户外景区得到初步应用，但温差能和振动能采集技术仍处于实验室阶段。

视觉感知与边缘 AI

- 视觉感知是智慧旅游感知层的前沿方向。与传统传感器采集结构化数据不同，视觉传感器（摄像头）采集的是非结构化的图像数据，需要 AI 算法进行理解和分析。
- Bi 和 Liu （2022）的基于机器学习的云 IoT 平台 [9] 展示了 AI 在视觉感知中的应用——通过 " 智能鹰眼系统 " 形成景区的 " 隐形防护网 "，在安全监控和客流分析方面实现了比传统传感器更高的精度。
- 随着边缘 AI 芯片的发展，视觉感知正在从云端处理转向边缘处理——在摄像头内部就完成图像识别和分析，只传输结构化的结果数据而非原始图像。
- 这种 " 感知即智能 " 的模式大幅降低了网络带宽需求和数据存储成本，同时减少了隐私风险（原始图像不传输不存储）。

11

实践案例深度分析

案例一： 5G 智慧旅游 IoT 三层架构

- Peng 等（2020）提出的 5G 智慧旅游 IoT 三层架构是感知层设计的典型案例 [7]。
- 该架构分为用户层（无线传感系统、RFID 系统、卫星遥感系统）、网络层（有线网络、互联网、无线 5G 网络）和服务层（云端智能应用）。
- 其创新之处在于将 5G 网络作为感知层的统一通信 backbone，解决了传统感知网络中多种通信技术并存的碎片化问题。

案例二：基于机器学习的云 IoT 平台

- Bi 和 Liu （2022）的云 IoT 平台 [9] 在感知层集成了机器学习能力。平台用户层包含多种 IoT 终端设备（电脑、汽车、飞机、手机），通过网络层（WLAN/ 有线 /5G）连接到服务层的云平台。
- 在安全方面，平台利用边缘计算 AI 的智能鹰眼系统形成景区的 " 隐形防护网 "，展示了 AI 增强感知层安全性的新路径。

案例三：文旅场景边缘感知系统

- 2025 年的研究提出了基于边缘计算的分布式文旅感知架构 [18]，通过三层体系结构整合多源异构传感器数据，实现对文旅场景的全方位感知。
- 系统采用边缘节点计算资源调度机制、多模态传感器数据融合算法及轻量化深度学习推理引擎等关键技术，结合云边协同数据处理框架，有效降低网络延迟，提升系统性能。
- 测试结果表明该系统在响应时间、处理吞吐量和资源利用率方面均优于传统集中式架构。

12

理论深化与前沿探讨

感知层的质量评估框架

- 感知层数据质量是决定整个智慧旅游系统效能的基础因素。低质量的感知数据会导致下游的数据分析和 AI 模型产生错误结论—— " 垃圾进，垃圾出 " （ Garbage In, Garbage Out ）。
- 因此，建立感知层质量评估框架至关重要。
- 感知层质量可以从以下六个维度评估：
 - 准确性（ Accuracy ）。传感器读数与真实值之间的偏差。准确性受传感器本身的精度等级、校准状态和使用环境影响。例如，温湿度传感器在极端高温环境下精度会下降，需要定期校准。
 - 完整性（ Completeness ）。预期应采集的数据中实际被采集的比例。完整性受设备故障率、网络覆盖盲区和数据传输丢包率影响。一个设计良好的感知系统应实现 95% 以上的数据完整性。

感知层的质量评估框架

- 时效性（Timeliness）。数据从产生到可用于分析的时间延迟。不同应用对时效性要求不同——应急指挥要求秒级延迟，客流统计可以接受分钟级延迟。
- Bi 和 Liu （2022）的云 IoT 平台 [9] 通过 5G 网络实现了毫秒级数据传输延迟。
- 一致性（Consistency）。同一对象在不同传感器或不同时间点的读数是否一致。多传感器融合时，不一致的数据需要通过融合算法进行调和。
- 唯一性（Uniqueness）。数据是否被重复采集或传输。重复数据不仅浪费存储和计算资源，还可能导致分析结果偏差。
- 可信度（Believability）。数据来源的可靠程度。经过认证的传感器数据可信度高于未认证设备，经过校准的数据可信度高于未校准数据。

感知层架构的形式化描述

- 感知层架构可以用形式化模型描述：
- $S = (D, C, P, F)$
- $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 为传感器设备集合，每个 $d_i = (\text{type}, \text{location}, \text{protocol}, \text{frequency}, \text{accuracy})$
- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 为通信通道集合，每个 $c_j = (\text{technology}, \text{bandwidth}, \text{range}, \text{latency})$
- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ 为数据处理管道集合，每个 $p_k = (\text{input}, \text{transform}, \text{output})$

感知层架构的形式化描述

- $F: D \times C \rightarrow P$ 为设备到管道的映射函数
- 这一形式化描述有助于架构师在设计阶段系统地枚举和评估感知层组件，确保不遗漏关键要素。

感知层的能耗优化

- 大规模传感器网络的能耗管理是感知层可持续运行的关键挑战。不同通信技术的功耗差异显著：
- 能耗优化策略包括：自适应采样频率（客流高峰时提高采样频率，低谷时降低）、休眠 - 唤醒机制（传感器在不采集数据时进入低功耗休眠模式）和数据压缩（在传感器端就进行数据压缩，减少传输能耗）。
- Ma （2023）的智慧旅游服务系统 [13] 通过机器学习优化传感器采样策略，在保证数据质量的前提下将能耗降低了约 40%。

13

产业化路径补充

感知设备的标准化与互操作性

- 感知设备市场目前存在严重的碎片化问题——不同厂商的传感器使用不同的通信协议、数据格式和管理接口，导致系统集成本高昂。标准化是解决这一问题的根本路径。
- 国际层面，oneM2M（全球物联网标准伙伴关系）正在制定统一的IoT通信协议标准。国内层面，CCSA（中国通信标准化协会）已发布多项IoT相关标准。
- 但在智慧旅游领域，专门的感知设备标准仍属空白。
- S.M.A.R.T. 框架的S维度为感知设备标准化提供了概念框架——通过统一的数据采集协议和接口规范，使不同厂商的传感器能够即插即用集成到智慧旅游系统中。

感知层的人才培养

- 感知层的设计和运维需要跨学科人才——既理解传感器物理原理，又掌握网络通信技术，还熟悉旅游业务场景。当前高校教育中，这类跨学科人才培养机制尚不完善。
- 建议在旅游管理专业中增设 " 智慧旅游感知技术 " 课程，在电子信息专业中增设 " 旅游场景 IoT 应用 " 课程，培养能够跨越技术和旅游两个领域的复合型人才。

- 感知基础设施层（S）是 S.M.A.R.T. 框架的基座，负责智慧旅游系统的数据采集。
- 本章阐述了感知层的三大要素（传感器、终端设备、通信模块），详细介绍了 RFID、环境传感器、卫星定位和蓝牙 Beacon 等关键技术，
- 分析了多源异构数据采集协议（MQTT/CoAP/HTTP）和融合算法（卡尔曼滤波、贝叶斯估计、D-S 证据理论、深度学习），并讨论了感知层的工程实践要点。

- （识记） 感知层的三大要素是什么？各有什么功能？
- （理解） 比较 MQTT、CoAP 和 HTTP 三种数据采集协议的适用场景。
- （应用） 为一个 1000 亩的水乡古镇设计感知设备部署方案，说明传感器类型、数量和通信方式。
- （分析） 分析边缘网关在感知层与数据平台层之间的 " 桥梁 " 作用，讨论其核心功能。
- （评价） 评估蓝牙 Beacon 室内定位技术在博物馆场景中的精度、成本和可维护性。
- （创造） 设计一个面向山地型景区的多层次感知网络方案，解决通信盲区和供电问题。

- [1] Guo Y, Liu H, Chai Y. The embedding convergence of smart cities and tourism
- [2] Gretzel U, Sigala M, Xiang Z, Koo C. Smart tourism: foundations and developm
- [3] Rosário A T, Dias J C. Exploring the Landscape of Smart Tourism: A Systemati
- [4] Tang R, Huang C, Zhao X, Tang Y. Research on Smart Tourism Oriented Sensor N
- [5] Tripathy A K, Tripathy P K, Ray N K, Mohanty S P. iTour: The Future of Smart
- [6] Almobaideen W, Allan M, Saadeh M. Smart Archaeological Tourism in the Contex

谢谢聆听 · 下章再见

安顺学院旅游管理学院 · 数字文旅专业系列教材